

# МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЖЕЛЕЗНЫХ МЕТЕОРИТОВ ПРИ КИНЕТИЧЕСКОМ ИНДЕНТИРОВАНИИ

*Прокопович К.А., Козловских Е.С.*

*Руководители – к.т.н. Гроховский В.И., д.т.н. Смирнов С.В.*

Уральский федеральный университет имени первого президента России  
Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург,  
ksusha.89@bk.ru

Метеориты являются одним из наиболее осязаемых свидетельств бомбардировки Земли малыми телами и наиболее доступными для лабораторных исследований веществом внеземного происхождения. Однако данные о механических характеристиках фаз метеоритов весьма ограничены. В то же время в последние годы вследствие развития компьютерных и инженерных технологий получили развитие новые методы для определения свойств микрообъектов.

Среди существующих методов оперативного неразрушающего контроля и диагностики механических свойств материалов наиболее эффективным и перспективным является метод кинетического индентирования. По сравнению с методами, основанными на измерении только твердости, данный метод отличается высоким уровнем информативности, возможностью полной автоматизации процесса испытания и обработки результатов.

Исторически первый и основной режим работы приборов кинетического индентирования реализуется путем внедрения геометрически аттестованного индентора под действием заданного профиля нормальной силы  $P(t)$  и одновременной регистрации глубины погружения его в материал  $h(t)$ . При помощи кинетического индентирования можно получить такие микромеханические характеристики материала, как: микротвердость, соотношение долей упругой и пластической деформаций, модуль упругости, вязкость разрушения и др.

Методы локального механического тестирования материалов зачастую подразделяют на макро-, микро-, нано- и даже пикоиндентирование чисто формально, ориентируясь на характерные размеры отпечатка, которые попадают в тот или иной диапазон. Однако можно провести классификацию этих методов, более обоснованную физически. С ростом силы  $P$  меняется не только характерный размер локально деформированной области, но и соотношение между упругой и пластической деформацией. При макроиндентировании упругой деформацией в первом приближении можно пренебречь, в нано-области, наоборот, вся деформация является чисто упругой. При микроиндентировании необходим одновременный учет и упругой, и

пластической деформации, поскольку их вклад в общую деформацию становится сопоставимым.

Железные метеориты почти целиком состоят из никелистого железа и содержат небольшие количества фаз в виде включений. Основные формы: камасит ( $\alpha$ -фаза) – 6...7 % никеля, тэнит ( $\gamma$ -фаза) – содержание никеля 30-50%. Размеры фазовых составляющих метеоритов во многих случаях весьма малы, поэтому использование метода кинетического индентирования для изучения и диагностики представляется достаточно перспективным. В настоящей работе приведены результаты измерений твердости, доли пластической и упругой деформации для различных фаз пяти метеоритов (таблица 1), полученные на микротвердомере Fisher SCOPE 2000.

Таблица 1 – Исследуемые метеориты

Метеорит	Содержание Ni, %	Исследуемые фазы
Грубый октаэдрит Сихотэ-Алинь IIВ-OgH	5,9	Камасит $\alpha$ -Fe(Ni, Co) Рабдит (Fe, Ni, Co) <sub>3</sub> P
Атаксит Чинге IVB-D	16,6	Матрица ( $\alpha$ + $\gamma$ + $\alpha_2$ ) Камасит $\alpha$ -Fe(Ni, Co) Добреелит Cr <sub>2</sub> FeS <sub>4</sub> Тэнит $\gamma$ -Fe(Ni, Co)
Атаксит Дронино	9,8	Матрица ( $\alpha$ + $\alpha_2$ ) Переходная окисленная зона Троилит FeS
Октаэдрит Lombard II AB	5,65	Камасит $\alpha$ -Fe(Ni, Co) Шрейберзит (Fe, Ni, Co) <sub>3</sub> P
Октаэдрит Canyon Diablo IA-Og	7,1	Камасит $\alpha$ -Fe(Ni, Co) Облачный тэнит $\gamma$ -Fe(Ni, Co)

Проведена серия измерений свойств камасита метеорита Чинге при нагрузках 10, 25, 50 и 150 мН, что относится к области микроиндентирования. Минимальный разброс полученных значений наблюдался при нагрузке 50 мН, поэтому дальнейшие измерения проводились при ней. Результаты проведенных испытаний для всех изученных фаз приведены на рисунке 1 в виде тренда «nplast –HV».

С ростом твердости фаз от 174 МПа до 1138 МПа доля их пластической деформации при индентировании уменьшается от 96 % до 50,8%. Самым хрупким (nplast 50,8 %...54,9 %) и твердым из исследуемых фаз является шрейберзит в образце метеорита Lombard.

Самым мягкий и самый пластичный, но обладающий наибольшими значениями показателя упругой деформации из исследуемых фаз является

камасит метеорита Canyon Diablo (доля пластической деформации  $95,8\% \div 96\%$ ). Чуть менее пластичными и чуть менее твердыми по отношению к камаситу в образце метеорита Canyon Diablo, являются камасит образца метеорита Lombard, камасит метеорита Сихотэ-Алинь, матрица метеорита Дронино, камасит, тэнит и матрица в образце метеорита Чинге, тэнит в метеорите Canyon Diablo.

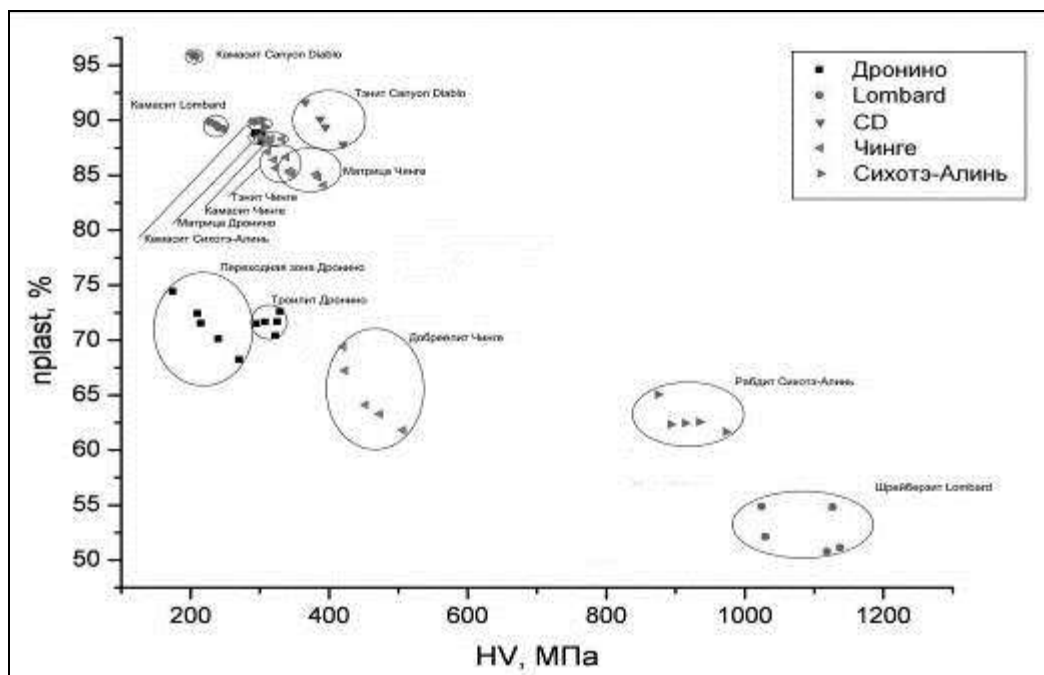


Рисунок 1. Распределение экспериментальных значений микромеханических характеристик для исследуемых минералов метеоритов в координатах «nplast-HV»

Одними из самых мягких фаз ( $HV = (174...352)$  МПа), и при этом обладающими близкими значениями модуля упругости являются троилит и переходная зона в метеорите Дронино. Доля пластической деформации в данных образцах лежит в диапазоне  $61,7\% \dots 74,4\%$ . Немного более твердым и хрупким оказался добреелит метеорита Чинге. Наименьшими значениями модуля упругости обладают камасит в метеорите Сихотэ-Алинь и тэнит в метеорите Чинге.

Представленные данные носят на первый взгляд тривиальный характер, т.е. доля пластической деформации наиболее высокая у минералов с низкими значениями HV, но впервые эти соотношения получили численные значения. Наблюдаемые отличия в микромеханических характеристиках одинаковых фаз в разных метеоритах объясняется различным химическим составом и различной термической и ударной предысторией вещества метеоритов.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 10-05-96047-р\_урал\_a и ФЦП «Кадры» НК-605П\_19 № П1154.